

### **3 Bestimmung der Defektgrößenverteilung aus experimentellen Daten**

Die Bestimmung der Defektgröße wird in der Literatur z.B. in [13]-[19] diskutiert. Zwei Aspekte stehen dabei besonders im Vordergrund:

- Wie ist die Defektgröße definiert?
- Sollten zur Größenbestimmung optische Meßgeräte (z.B. Waferscanner, Mikroskop) oder sogenannte Defektmonitorstrukturen, die auf elektrischer Basis arbeiten, verwendet werden?

Diese Fragen sollen in den nächsten Abschnitten im Mittelpunkt stehen.

#### **3.1 Definition der Defektgröße**

Zur Bestimmung der Defektgröße wird zunächst davon ausgegangen, daß ein Defekt optisch erfaßt und vermessen werden kann. Dabei soll es keine Rolle spielen, ob die Vermessung manuell am Mikroskop, oder durch automatisch arbeitende Maschinen durchgeführt wird.

In der Literatur (z.B. [1] und [4]) wird angenommen, daß die Form eines Defekts im wesentlichen durch einen Kreis beschrieben werden kann. Die Defektgröße entspricht dann dem Kreisdurchmesser. Ebenso wurde versucht, die Defektform mit einem Rechteck zu beschreiben [34], [39]. Vergleicht man einen quadratisch geformten Defekt mit einer Kantenlänge von etwa 4  $\mu\text{m}$  mit einem kreisrunden Defekt, dessen Durchmesser auch 4  $\mu\text{m}$  beträgt, so führt der quadratische Defekt in dem bei [34] gewählten Beispiel mit einer um 20 Prozent höheren Wahrscheinlichkeit zum Ausfall (hier durch Kurzschluß).

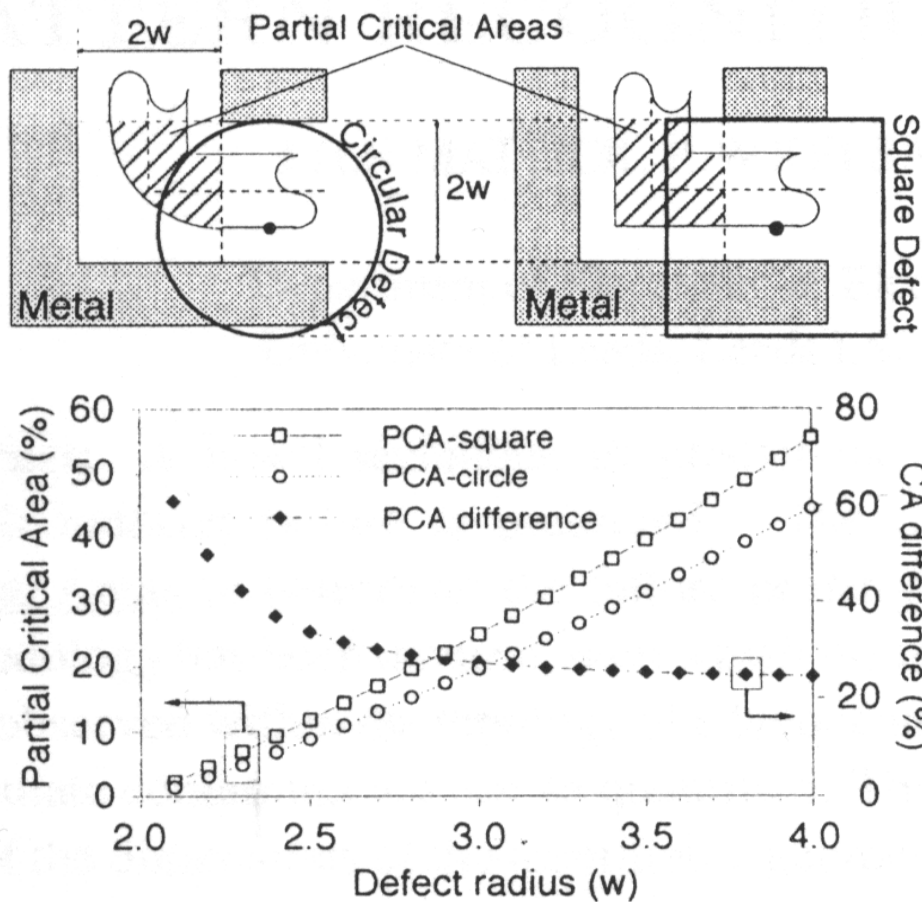


Abbildung 5: Wahrscheinlichkeit der Schaltungsbeschädigung in Abhängigkeit vom Defektmodell (Rechteck / Kreis) aus [34]

Ein weiterer Vorschlag, die Defektform zu beschreiben, findet sich in [13], [14] und [17]. Es wird angenommen, daß die äußere Form eines Defekts mit einer Ellipse angenähert werden kann. Dazu wird die minimale und die maximale Defektausdehnung bestimmt. Aus diesen Werten läßt sich eine Ellipse konstruieren, deren Form recht gut die wahre Gestalt des Defekts wiedergibt.

Da alle bisher bekannten Modelle zur weiteren Verarbeitung der Defektgröße aber nur von *einer* Defektausdehnung Gebrauch machen, besteht die nächste Aufgabe darin, die minimale und maximale Ausdehnung in *einen* Wert umzurechnen. Die Umrechnung muß dabei so erfolgen, daß ein tatsächlich vorhandener Defekt in einen kreisrunden Defekt umgerechnet wird, der mit gleicher Wahrscheinlichkeit einen Fehler verursacht. Dafür gibt es im wesentlichen vier Möglichkeiten:

Tabelle 1: Berechnungsmöglichkeiten der Defektgröße  $d_0$

Name des Verfahrens	Berechnung	
1. Methode des kleinsten Kreises	$d_0 = d_{\min}$	(3.1)
2. Methode des größten Kreises	$d_0 = d_{\max}$	(3.2)
3. Methode des mittleren Kreises	$d_0 = (d_{\min} + d_{\max}) / 2$	(3.3)
4. Integrationsmethode nach [15]	$d_0 = \frac{\min}{180^\circ} \cdot \int_0^{180} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-k^2 \cdot \sin^2(\alpha)}} \approx \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\min \cdot \max} + \frac{\min \cdot \max}{\min + \max}$	(3.4)

Die folgenden Grafiken nach [15] (Abbildung 6 und Abbildung 7) zeigen den Einfluß der einzelnen Methoden auf den jeweils bestimmten Defektdurchmesser. Man sieht, daß sowohl die Methode des kleinsten Kreises als auch die Methode des größten Kreises die wahre Defektgröße nur schlecht wiedergibt. Schon besser geeignet ist die Methode 3, doch nur der durch Integration bestimmte Defektdurchmesser beschreibt die wahre Defektausdehnung zufriedenstellend.

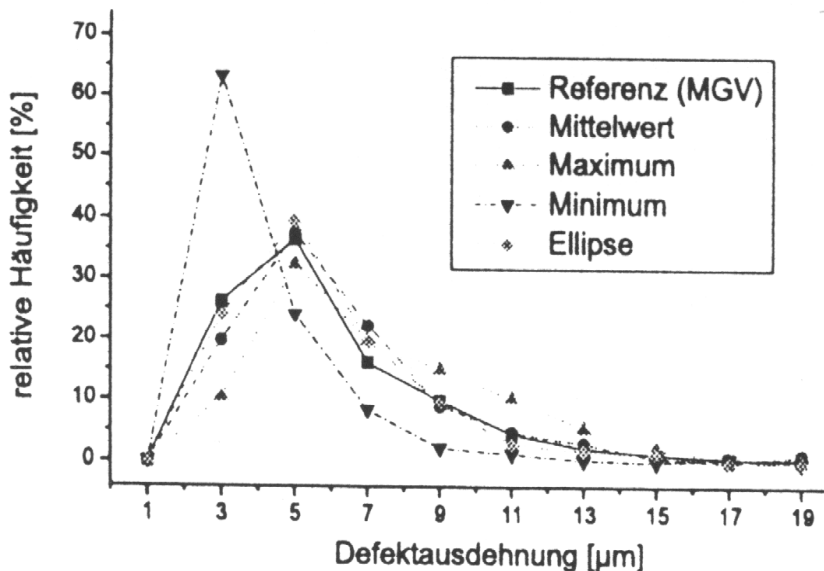


Abbildung 6: Einfluß der Meßmethode auf den ermittelten Defektdurchmesser nach [15]

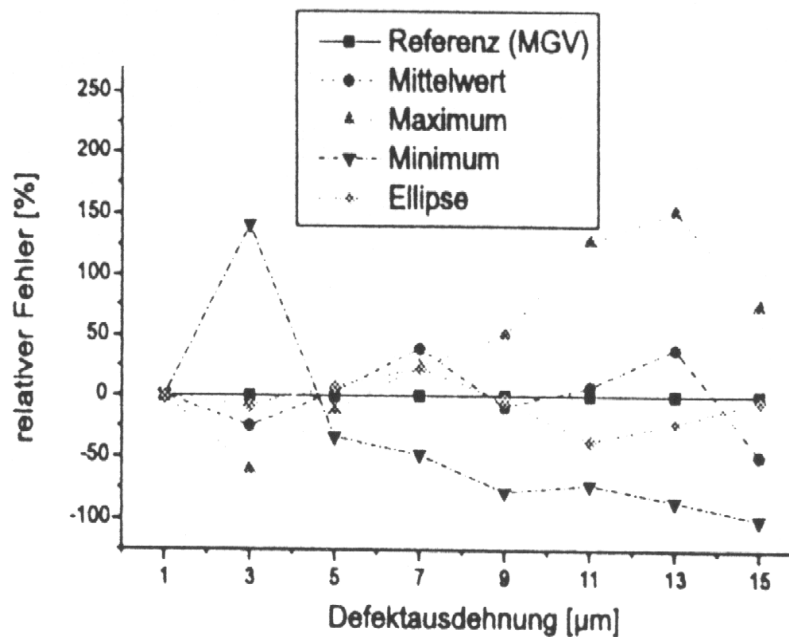


Abbildung 7: Einfluß der Meßmethode auf Fehler des ermittelten Defektdurchmessers nach [15]

Die als Integrationsmethode bezeichnete Vorgehensweise führt zum besten Ergebnis, ist aber auch am aufwendigsten. Man bestimmt unabhängig von der Orientierung des Defekts dessen minimale und maximale Ausdehnung, um anschließend über die Näherungsformel (3.4) einen mittleren Ellipsenradius zu berechnen.

Nimmt man an, daß die Defekte vollkommen zufällig orientiert sind und sich die Orientierung eines Defekts nicht auf die anderen auswirkt, so muß es ausreichen, die Ausdehnung *aller* Defekte in *einer* beliebigen aber für alle Defekte festen Richtung zu bestimmen [11]. In der Abbildung 8 entspricht diese Defektausdehnung dem Wert von  $d_{\text{mittel}}$ .

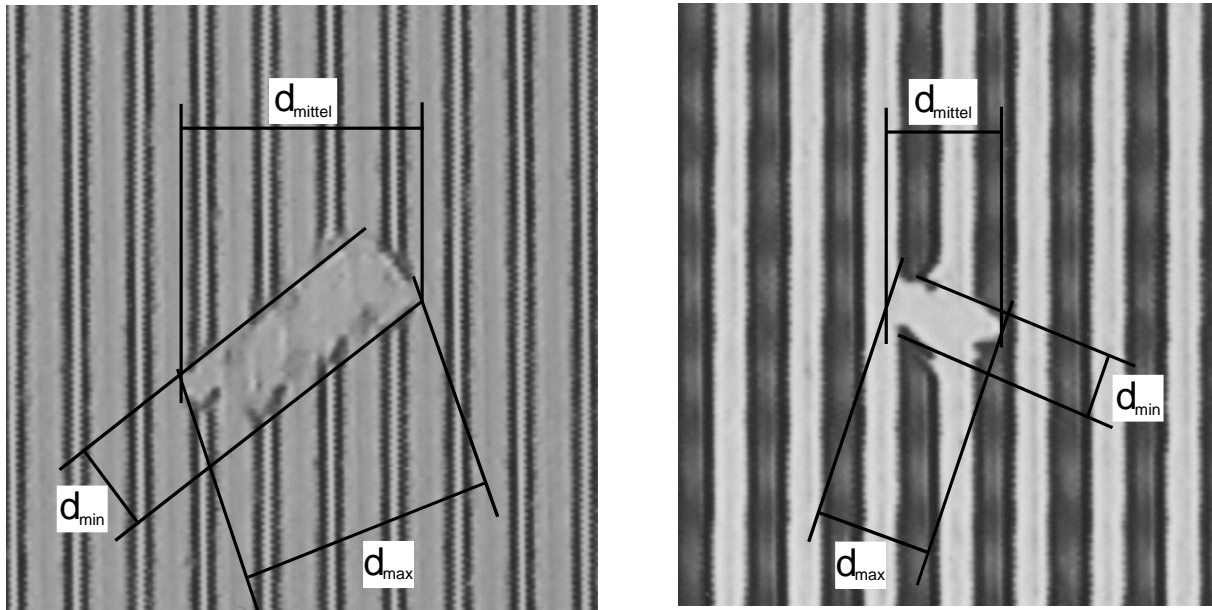


Abbildung 8: Erklärung zur Defektorientierung

## 3.2 Extraktion der Defektgröße aus elektrischen Messungen

### 3.2.1 Bekannte Verfahren

Zur Bestimmung von Defektausdehnungen aus elektrischen Messungen sind spezielle Teststrukturen erforderlich. Sehr häufig werden sogenannte Defektmonitore beschrieben, die Kurzschlußdefekte detektieren, indem der sich bei Anwesenheit eines Defekts ändernde Widerstand einer mäanderförmigen Leitbahn gemessen wird ([3], [4]). Anschließend wird versucht, aus dieser Widerstandsänderung auf die Anzahl miteinander verbundener Leitbahnen zu schließen. Diese Angaben sind aber meist recht grob und reichen für eine genauere Defektgrößenklassifizierung oft nicht aus.

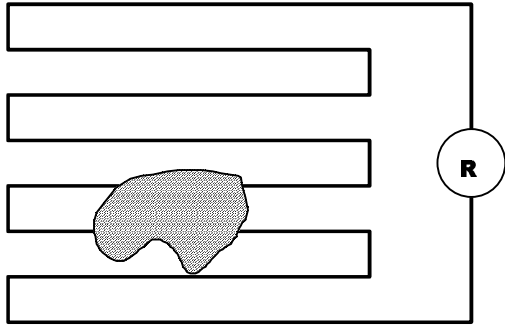


Abbildung 9: Einfacher Defektmonitor

Für genauere elektrische Defektgrößenbestimmungen werden Strukturen verwendet, bei denen die Anzahl kurzgeschlossener benachbarter Leitbahnen direkt aus den elektrischen Daten ermittelt werden kann. Eine in [1] und [18] beschriebene sogenannte Doppelbrückenteststruktur beruht auf diesem Prinzip (siehe Abbildung 10). Die Anzahl der verbundenen Leitbahnen läßt sich in einem Histogramm auftragen, aus dem anschließend die Defektgrößenverteilung berechnet wird. Ein Nachteil dieser Struktur ist allerdings, daß sie zur Präparation mindestens drei Ebenen benötigt und damit der Produktionsaufwand relativ hoch ist.

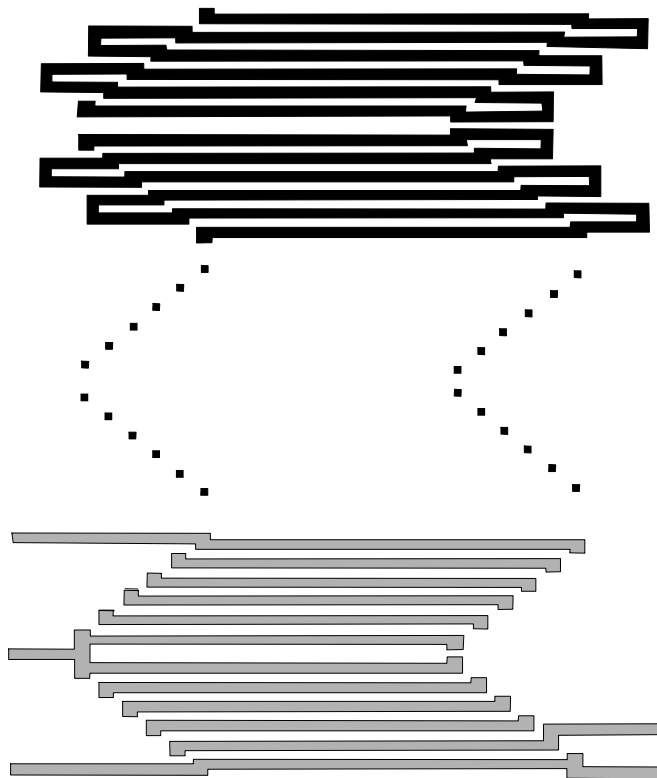


Abbildung 10: Doppelbrückenteststruktur nach [1]

Eine weitere Möglichkeit, Defekte zu erkennen, die Kurzschlüsse verursachen, wird in [4] und [10] mit einer sogenannten Karree-Teststruktur beschrieben (siehe Abbildung 11). Bei dieser Struktur werden sich gegenüberstehende Kammsegmente mit einem Padrahmen kontaktiert. Durch die Segmentierung der Käme lassen sich die Orte der durch Defekte verursachten Kurzschlüsse sehr genau aus den elektrischen Meßwerten bestimmen. Während diese Struktur sehr gut zur Kurzschlußerkennung geeignet ist, kann sie zur Erkennung von Unterbrechungen nicht verwendet werden.

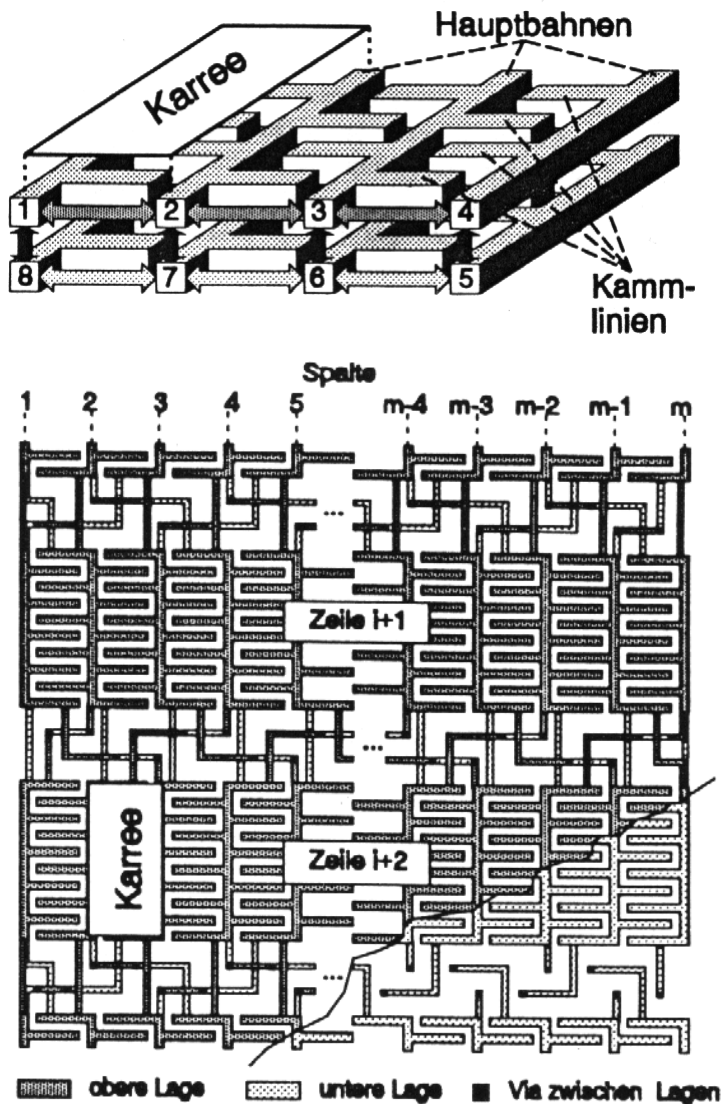


Abbildung 11: Karree-Struktur nach [4]

In [9] und [11] wird eine Struktur beschrieben (siehe Abbildung 12), bei der benachbarte geradlinige Leitbahnen mit einem Padrahmen so verbunden werden, daß man mit relativ wenigen Anschlüssen alle Leitbahnen durch gezielte Kombinationen der Anschlüsse auf Kurzschlüsse untersuchen kann. Mit einer speziellen Auswerterroutine werden zum einen der Ort des Kurzschlusses und zum anderen die Defektgröße ermittelt. Obwohl das Design mit zwei Ebenen beschrieben wird, kann die Teststruktur auch mit einer Ebene realisiert werden, wodurch sich der Fertigungsprozeß vereinfacht. Auch diese Struktur ist auf kurzschlußverursachende Defekte beschränkt.



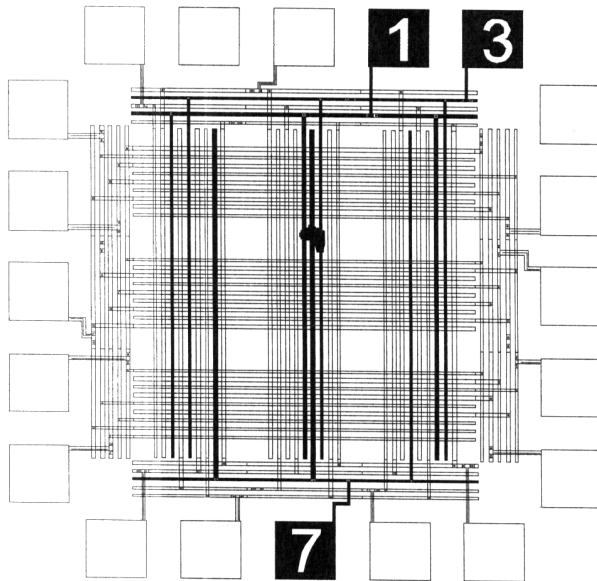


Abbildung 12: Harfenstruktur nach [11]

### 3.2.2 Benutzer Defektmonitor

Der zur Bestimmung der Defektgrößenverteilung und der Defektdichte verwendete Monitorchip weist gegenüber den in der Literatur vorgeschlagenen Defektmonitorstrukturen einige Vorteile auf:

- Er kann als Ein- oder Zwei-Ebenen-Variante ausgeführt werden und läßt sich auch aufgrund der Einfachheit des Layouts ohne großen Aufwand in den Fertigungsprozeß integrieren.
- Eine optionale untere Ebene besteht aus zwei ineinandergreifenden Kämmen. Sie soll einerseits die Topologie "normaler" Produktchips imitieren und wird andererseits dazu genutzt, die Güte des Zwischenisolators, der zwischen dieser und der zweiten Ebene liegt, zu prüfen.

Bei der erwähnten zweiten Ebene handelt es sich im wesentlichen um eine wechselweise Anordnung von Kämmen und Mäandern. Die folgende Abbildung 13 zeigt ausschnittsweise den prinzipiellen Aufbau der Teststruktur, während die Abbildung 14 schematisch den Aufbau des gesamten Chips darstellt:

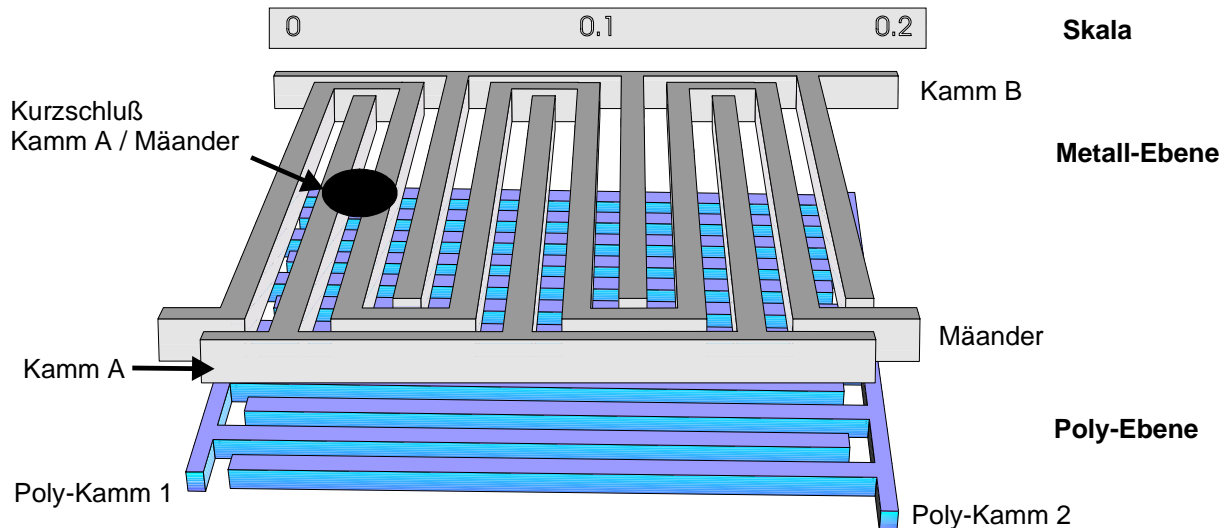


Abbildung 13: Prinzipskizze der verwendeten Teststruktur

Für die folgenden Ausführungen ist nur der als "Metall-Ebene" gekennzeichnete Layer von Interesse. Die darunter liegende Ebene ist in der Grafik zwar mit "Poly-Ebene" bezeichnet, kann aber bei Bedarf auch als Metallebene ausgeführt werden. Auf sie soll jetzt nicht weiter eingegangen werden.

Die Leitbahnbreiten  $w$  der beiden Käme und des Mäanders der Metallebene sind jeweils gleich groß. Die Abstände  $s$  zwischen benachbarten Bahnen sind ebenfalls gleich groß, außerdem gilt  $s = w$ . Von der oben abgebildeten Teststruktur wurden 24 Stück auf einem Chip plaziert, wobei drei verschiedene Leitbahnbreiten und -abstände mit jeweils acht Strukturen, nachfolgend Elemente genannt, realisiert wurden:

Tabelle 2: Zuordnung der Testelemente zu den Leitbahnbreiten und -abständen

Element	Leitbahnbreite $w$ / Leitbahnabstand $s$ in $\mu\text{m}$
1 – 8	0.8 / 0.8
9 – 16	1.2 / 1.2
17 – 24	1.6 / 1.6

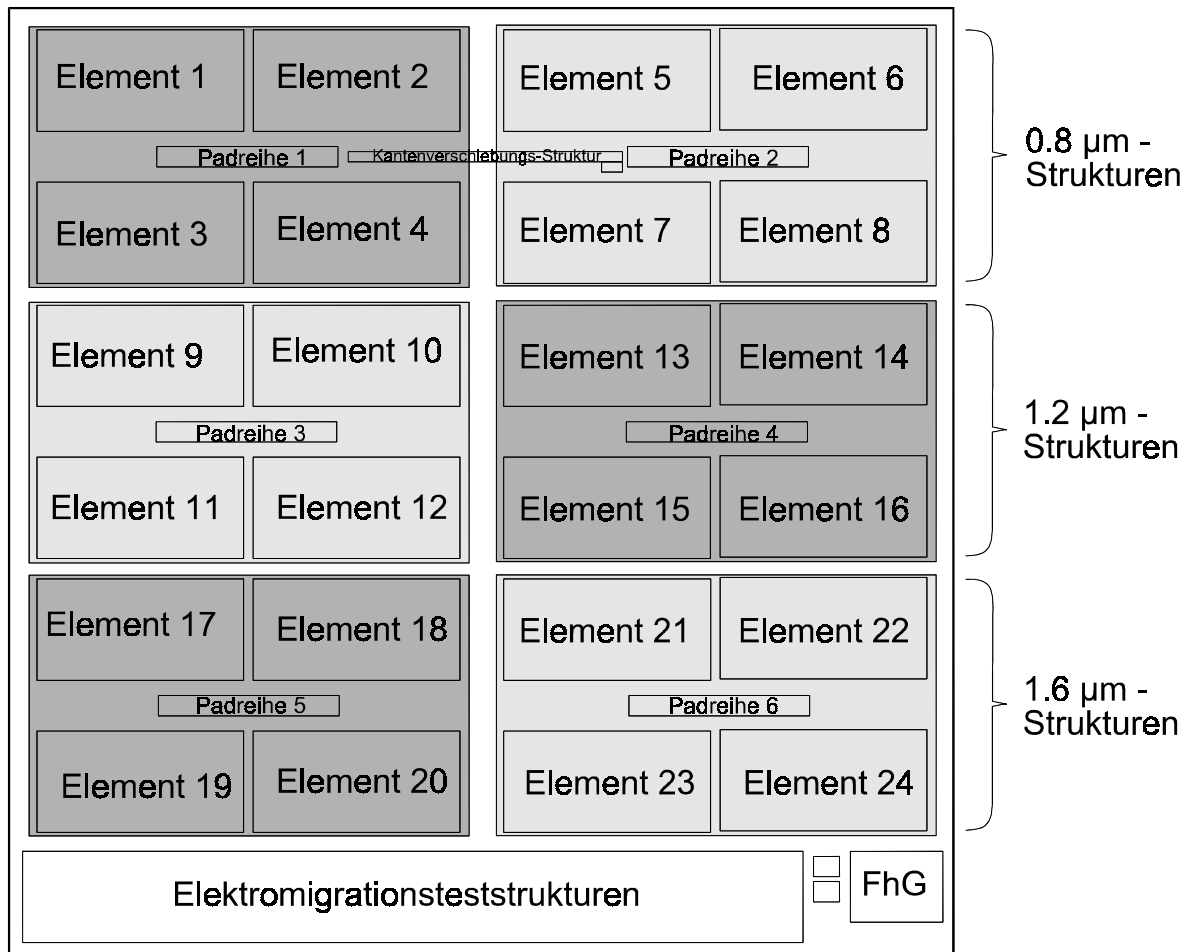


Abbildung 14: Übersichtsdarstellung zum verwendeten Defektmonitorchip

Durch Widerstandsmessungen zwischen dem Mäander M und den beiden benachbarten Kämmen A und B ist es möglich, Defekte festzustellen, die zum Kurzschluß führen:

- Wird ein endlicher Widerstand zwischen dem Mäander und nur einem Kamm festgestellt, so handelt es sich um einen sogenannten Einfachkurzschluß: Der Defekt verbindet maximal zwei Leitbahnen miteinander. Dieser Widerstand soll mit  $R_{\text{single}}$  bezeichnet werden.

- Endliche Widerstände zwischen der Durchgangsleitung und beiden Kämmen können sowohl von einem sehr großen Defekt, als auch von zwei Einzeldefekten hervorgerufen werden. Setzt man jedoch die beiden Einzelwiderstände  $R_{\text{single, A}}$  und  $R_{\text{single, B}}$  jeweils zum Widerstand der Durchgangsleitung  $R_{\text{Mäander}}$  ins Verhältnis, so lassen sich die Orte der Einzelkurzschlüsse bestimmen. Liegen die Orte dicht beieinander, d.h.  $R_{\text{single, A}} / R_{\text{single, B}} \approx 1$ , so wird dies als ein großer, mindestens drei Leitbahnen verbindender Defekt interpretiert. Die genaue Defektgröße muß anschließend manuell am Mikroskop bestimmt werden.
- Aufgrund der wechselweisen Anordnung von zwei Kämmen und einem Mäander ist es möglich, daß ein großer Defekt zwar einen Kurzschluß über drei Leitbahnen verursacht, aber dabei nur eine Kammeleitung und zwei Mäandersegmente verbindet. Ein solcher Kurzschluß würde dann fälschlich als Einfachkurzschluß interpretiert.
- Mehrfachkurzschlüsse können das Unterbrechungsergebnis verfälschen, wenn sie eine Unterbrechung überbrücken.

Für Unterbrechungen gilt dagegen:

- Unterbrechungen können nur dann registriert werden, wenn sie im Mäander auftreten.
- Eine Größenklassifizierung ist nur möglich, indem der Defekt optisch vermessen wird.
- Die Ortsbestimmung für Unterbrechungen ist durch eine Kapazitätsmessung zwischen einem Kamm und dem Mäander möglich.

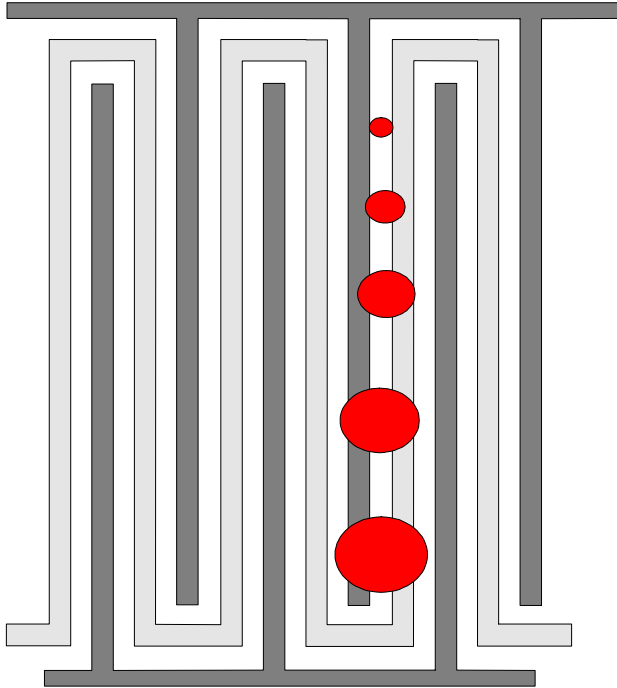


Abbildung 15: Defektgrößenbestimmung für Kurzschlüsse

Verbindet ein Defekt mit einem Durchmesser  $d$  eine Anzahl von  $n$  Leitbahnen miteinander, so kann  $d$  in gewissen Grenzen variieren, während  $n$  konstant bleibt (siehe Abbildung 15). Wird allein durch elektrische Messungen die Anzahl der kurzgeschlossenen Leitbahnen bestimmt, kann man nicht mit Sicherheit sagen, wie groß die jeweilige Defektausdehnung tatsächlich ist. Aus geometrischen Überlegungen ergibt sich für die Defektgröße ein möglicher Bereich von:

$$d_{\min}(n) = (n-1) s + (n-2) w \quad \text{bis} \quad d_{\max}(n) = (n+1) s + n w \quad (3.5)$$

$d_{\min, \max}$	<i>kleinster bzw. größter Defektdurchmesser, der zum Kurzschluß von <math>n</math> Leitbahnen führt</i>
$n$	<i>Anzahl der kurzgeschlossenen Leitbahnen</i>
$s$	<i>Abstand zwischen den Leitbahnen</i>
$w$	<i>Leitbahnbreite</i>

Da im Fall des verwendeten Monitorchips der Leitbahnabstand  $s$  gleich der Leitbahnbreite  $w$  ist, vereinfacht sich die Formel (3.5) zu folgendem Ausdruck:

$$d_{\min}(n) = (2n-3) w \quad \text{bis} \quad d_{\max}(n) = (2n+1) w \quad (3.6)$$

Es ergibt sich somit eine minimale und eine maximale Defektausdehnung  $d_{\min}$  und  $d_{\max}$ . Durch einfache Mittelung bekommt man für jede Anzahl  $n$  kurzgeschlossener Leitbahnen eine mittlere Defektausdehnung:

$$d_m(n) = (2n-1) w \quad (3.7)$$

$d_m(n)$       *mittlerer Defektdurchmesser, der zum Kurzschluß von  $n$  Leitbahnen führt*

Es ist aber allgemein bekannt, daß Defekte großer Ausdehnung im Vergleich zu Defekten mit kleinerer Ausdehnung seltener vorkommen. Das heißt, in dem von (3.5) vorgegebenen Bereich für den Defektdurchmesser  $d$  sind die Defekte nicht gleichverteilt. Dadurch wird die Mittelung aus  $d_{\min}$  und  $d_{\max}$  und damit die Anwendbarkeit der obigen Formel in Frage gestellt. Es wird deshalb folgende Verallgemeinerung vorgeschlagen:

$$d_m(n) = (2n - \Delta) w \quad (3.8)$$

$\Delta$       *Parameter zur Defektgrößenbestimmung*

Der zusätzliche Parameter  $\Delta$  läßt sich durch elektrische Messungen allein nicht feststellen. Er muß mit Hilfe optischer Defektvermessung bestimmt werden. Dazu wird z. B. am Mikroskop die Defektausdehnung der elektrisch bestimmten Kurzschlüsse senkrecht zur Leitbahnrichtung gemessen. Somit sind jetzt sowohl die Anzahl der kurzgeschlossenen Leitbahnen als auch die wirksame Defektausdehnung  $d_{\text{opt}}$  bekannt. Aus der Darstellung von  $d_{\text{opt}}/w$  über  $2n$  läßt sich ein mittlerer Wert für den Parameter  $\Delta$  bestimmen. Die nachfolgende Grafik zeigt das Ergebnis einer Defektgrößenanalyse, die im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit einer Partnerfirma angefertigt wurde:

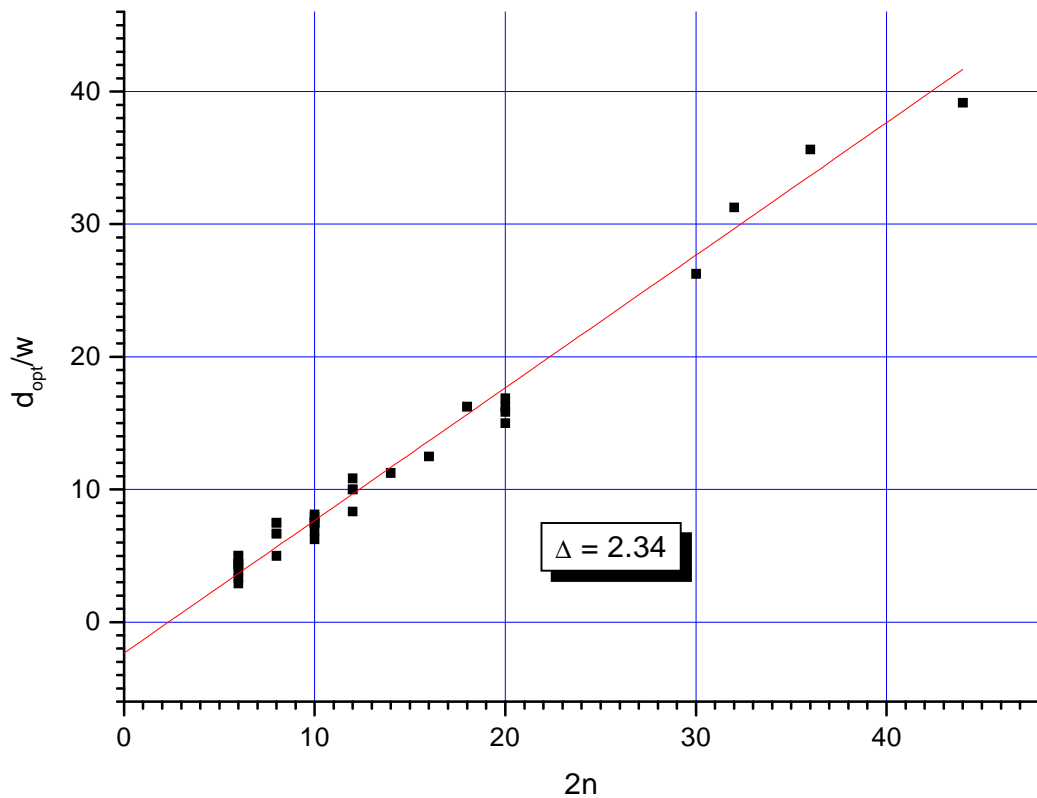


Abbildung 16: Zur Bestimmung des Parameters  $\Delta$  aus Formel (3.8)

Der hier ermittelte Wert von  $\Delta = 2.34$  weicht merklich vom Wert 1 ab, der durch einfache Mittelung aus Gleichung (3.7) folgt.  $\Delta > 1$  bedeutet, daß die wirksame "mittlere" Defektgröße kleiner ist als die Größe, die durch (3.7) berechnet wird. Dieses Ergebnis wird durch die allgemeine Beobachtung, daß in einem ausgewählten Defektgrößenbereich mehr kleine als große Defekte registriert werden, bestätigt. Erst durch Kenntnis des Wertes für  $\Delta$  kann aus elektrischen Messungen, die nur die Anzahl  $n$  der kurzgeschlossenen Leitbahnen liefern, für jedes  $n$  der entsprechende Durchmesser des einzelnen Defekts berechnet werden.

### 3.3 Bestimmung der elektrisch wirksamen Defektgrößenverteilung

Neben dem mittleren Durchmesser eines einzelnen Defekts ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller registrierten Defektausdehnungen eine zentrale Größe im Bereich der hier durchgeführten Untersuchungen. Bereits im Abschnitt 2.3.2 wurde nach der Herleitung der Formel (2.16) auf die Bedeutung dieser Defektgrößenverteilungsfunktion, die im folgenden mit  $S(d)$  bezeichnet werden soll, hingewiesen.

Die Funktion  $S(d)$  ist mathematisch gesehen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bzw. die Wahrscheinlichkeitsverteilung der stetigen Zufallsgröße "Defektausdehnung". Praktisch gibt sie an, wie häufig ein Defekt einer bestimmten Größe im Verhältnis zur Summe aller registrierten Defekte vorkommt.  $S(d)$  wird aus experimentellen Daten gewonnen, indem alle Defekte in Abhängigkeit von ihrer Ausdehnung in einzelne Größenklassen einsortiert und gezählt werden. An  $S(d)$  wird außerdem die mathematische Nebenbedingung gestellt, daß das Integral über den gesamten Defektgrößenbereich den Wert 1 ergeben muß. Diese Bedingung führt zur Normierung der Funktion  $S(d)$  (vgl. [47], [123], [128]).

Mit einem Monitorchip lassen sich im allgemeinen Defekte in einem relativ weiten Größenbereich registrieren. Dieser Größenbereich wird nach unten vom geringsten Leitbahnabstand für Kurzschlüsse bzw. von der geringsten Leitbahnbreite für Unterbrechungen begrenzt. Berechnet man nun die Defektgröße nach (3.8) und sortiert die Defekte in Größenklassen ein, so erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die prinzipiell der folgenden Abbildung entspricht:

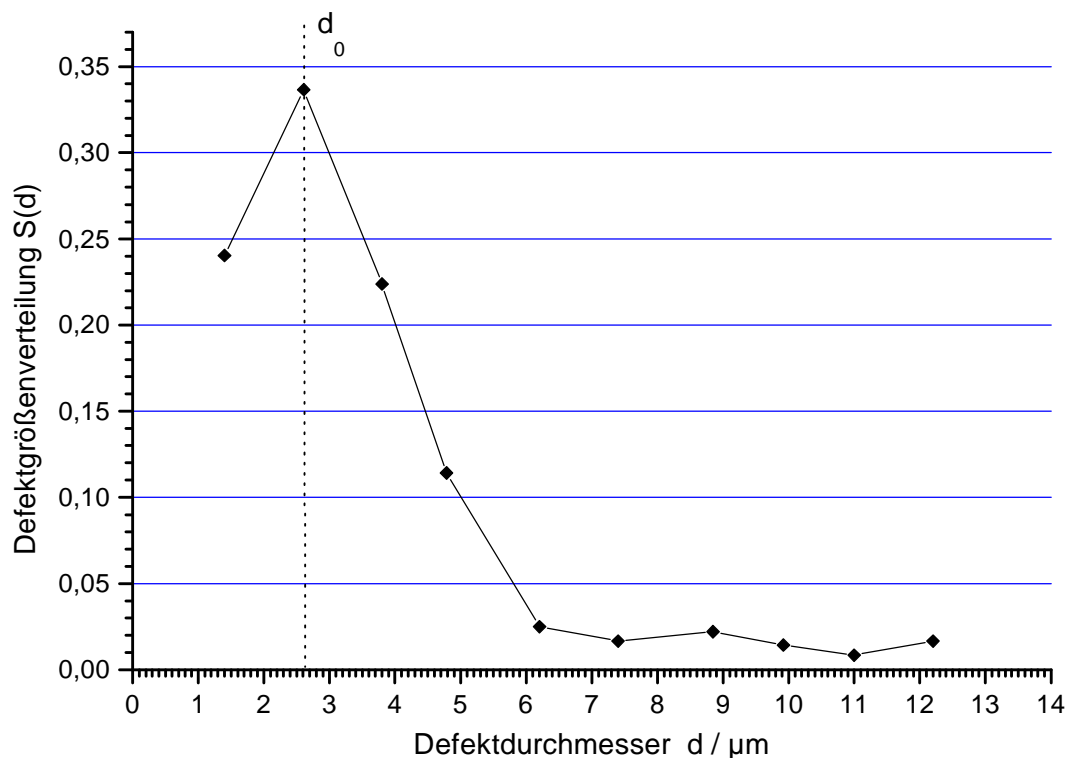


Abbildung 17: Defektgrößenverteilung mit typischem Abfall bei kleinen Defekten (Daten aus gesondertem Versuch)



Die Grafik zeigt, daß Defekte mit einem gewissen Durchmesser  $d_0$  am häufigsten registriert wurden. In Richtung größerer Defekte sinkt die Häufigkeit sehr stark ab. Es wird in der Literatur oft beschrieben, daß dieses Absinken proportional zu  $d^{-3}$  ist ( $S(d) \sim d^{-3}$ ). Die Anzahl der Defekte, die kleiner als  $d_0$  sind, nimmt mit kleineren Ausdehnungen stetig ab. Dieser Zweig der Verteilung wird in der Literatur meist mit einer Proportionalität von  $d$  angenommen ( $S(d) \sim d$ ) (vgl. [7], [9], [11], [25], [27], [28], [30], [47]).

Zweifellos ist der von  $d_0$  aus gesehen rechte Zweig der Wahrscheinlichkeitsverteilung intuitiv leicht einzusehen, da z.B. die Wahrscheinlichkeit, daß ein Partikel durch die Filteranlagen eines Reinraums ins Innere gelangen kann, mit zunehmender Größe abnimmt. Interessanter ist die Frage, warum die Anzahl der Defekte, die kleiner als  $d_0$  sind, auch abnimmt. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß ein Defekt, dessen Ausdehnung gerade so groß wie der Leitbahnabstand ist, nur dann einen Kurzschluß verursachen kann, wenn er genau in die Mitte der benachbarten Leitbahnen fällt. Wird er auch nur ein kleines Stück in Richtung der einen oder der anderen Leitbahn verschoben, so richtet er keinen Schaden mehr an. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein solcher Defekt von einem Defektmonitor erkannt wird, ist also sehr gering. Das heißt jedoch nicht, daß Defekte dieser Ausdehnung auch nur sehr wenig vorkommen können. Sie werden lediglich nicht erkannt.

Bei der Bestimmung der Defektgrößenverteilung und der anschließenden Normierung sollte also der Teil der unsicher registrierten Defekte unberücksichtigt bleiben. Nach dieser Korrektur ergaben sich bei allen bisher mit dem Defektmonitor durchgeführten Versuchen Grafiken, ähnlich der folgenden Form:

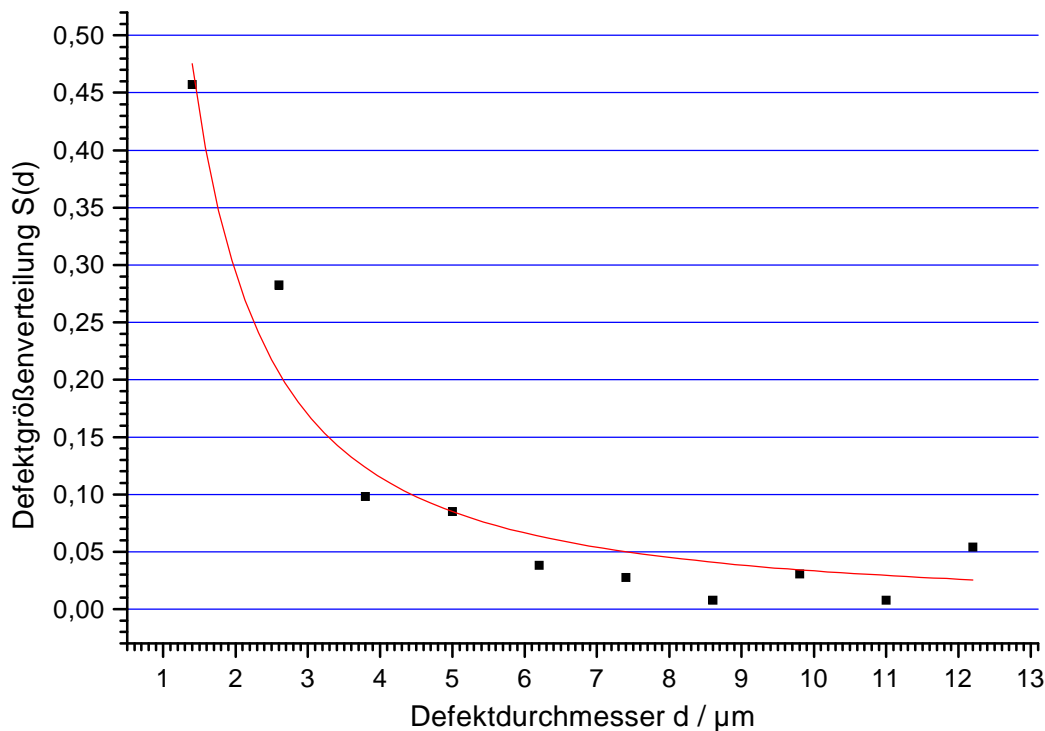


Abbildung 18: Defektgrößenverteilung über die sicher registrierten Defektgrößen

### 3.4 Verfahren zur optischen Defektgrößenbestimmung

Die Ausdehnung eines Defekts läßt sich natürlich auch allein mit optischen Mitteln bestimmen. Es gibt dazu eine Vielzahl automatischer Waferinspektionsgeräte, die sowohl in der Lage sind, Defekte nach ihrer Art zu klassifizieren, als auch Defektgrößen festzustellen. Im Prinzip beruht die Funktionsweise dieser Geräte auf zwei Verfahren [101]:

1. Ein Laser rastert den gesamten Wafer ab, und die Intensität des reflektierten Streulichts wird in Defektgrößen umgerechnet. Diese Umrechnung ist jedoch recht fehlerträchtig und bedarf einer sehr genauen Kalibrierung des Gerätes. Außerdem lassen sich mit diesem Verfahren nur Partikel finden, die *auf* dem zu untersuchenden Layer liegen. Partikel, die *in* dem Material des untersuchten Layers liegen, werden nicht gefunden. Eine Klassifizierung der Defektart ist ebenfalls nicht möglich. Der Vorteil dieser Streulichtmessung ist der geringe Zeitaufwand.

2. Es wird ein Bildvergleich zwischen dem zu untersuchenden Chipausschnitt und dem zugehörigen Ausschnitt eines Referenzchips durchgeführt. Die Unterschiede zwischen beiden Bildern werden herausgefiltert und mit einer Datenbank, in der die zum jeweiligen Fehlerbild gehörigen Defektarten abgelegt sind, verglichen. Kann das Fehlerbild in der Datenbank gefunden werden, dann läßt sich die gefundene Abweichung als eine bestimmte Defektart identifizieren. Die durch den Bildvergleich deutlich gewordenen Fehlerbilder lassen sich relativ genau vermessen, so daß die Defektgröße angegeben werden kann. Nachteilig für diese Art der Defektkontrolle sind der hohe Zeitbedarf und der große Aufwand der Datenbankerstellung.

### **3.5 Vergleich der optisch und elektrisch bestimmten Defektgrößenverteilungen**

Um eine Aussage über optisch bestimmte Defektgrößen zu bekommen, wurde in Zusammenarbeit mit einem Projektpartner das Verfahren des Bildvergleiches angewandt. Damit das Ergebnis mit elektrischen Messungen an Monitorstrukturen vergleichbar ist, dürfen in eine Ermittlung der optischen Defektgrößenverteilung jedoch nur die Defekte einbezogen werden, die als elektrisch wirksam klassifiziert werden.

Nach einer entsprechenden Festlegung, welche Defektklassen berücksichtigt werden sollen, wurde die in der folgenden Grafik abgebildete Defektgrößenverteilung während eines Versuchs ermittelt. Um einen Vergleich zur elektrischen Verteilungskurve zu bekommen, wurde diese in die Grafik mit eingeblendet:

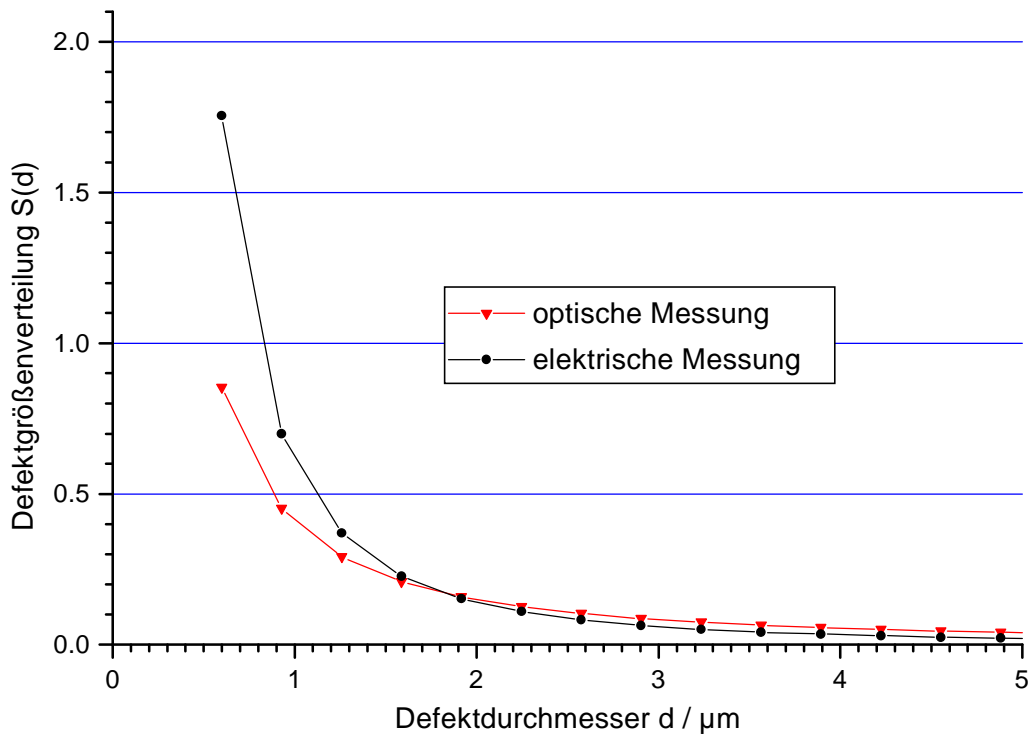


Abbildung 19: Vergleich der auf optischem und elektrischem Weg ermittelten Defektgrößenverteilungen

Die Grafik zeigt, daß im Bereich der größeren Defekte die Kurven sehr gut miteinander übereinstimmen. Bei kleineren Defektgrößen steigt die Abweichung jedoch an. Der Grund dafür ist, daß es sich bei der hier gezeigten Defektgrößenverteilung um Defekte der zweiten Metallebene des Defektmonitors handelt, die über der Polystruktur liegt (zur Beschreibung des Defektmonitors siehe Abschnitt 3.2.2). Das verwendete Inspektionsgerät (KLA 2031) mußte insbesondere für kleine Defektgrößen, also geringe Bildunterschiede, unempfindlicher eingestellt werden. Sonst hätte die Maschine die unter dem Metall liegenden Polyleitbahnen als Defekte erkannt und das Ergebnis verfälscht.

Die gute Übereinstimmung der elektrisch und der optisch bestimmten Defektgrößenverteilungsfunktionen ist eine Bestätigung der Formel (3.8), da diese zur Berechnung der einzelnen Defektgrößen aus der Anzahl der beschädigten Leitbahnen des Defektmonitorchips benutzt wurde. Erst wenn die einzelnen Defektgrößen korrekt aus den elektrischen Daten extrahiert werden, ergibt sich die entsprechende Größenverteilung. Wenn es also gelingt, aus der Änderung des Widerstandes der Mäanderleitbahn auf die Anzahl der beschädigten Mäandersegmente zu schließen, kann unter Kenntnis des Parameters  $\Delta$  der Gleichung (3.8) auf eine optische Defektvermessung verzichtet werden.

### **3.6 Verfahren zur Berücksichtigung der realen Defektform**

Die bisher bekannten Modelle zur Berechnung der reduzierten Chipfläche gehen von der Annahme aus, daß ein Defekt als kreisrunde Scheibe beschreibbar ist. Die Praxis zeigt jedoch, daß die reale Defektform mehr oder weniger stark von dieser Modellvorstellung abweicht. In [13], [14] und [17] wird ein Verfahren beschrieben, mit dessen Hilfe die Defektform mit einer Ellipse modelliert wird. Aus den Parametern der Ellipse wird ein mittlerer Defektdurchmesser bestimmt, der anschließend in die herkömmlichen Modelle zur Defektgrößenverteilung einfließt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Prinzip zur Berücksichtigung der realen Defektform entwickelt. Zunächst werden die Defektgrößen entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.2.2 (Abbildung 15) bestimmt. Zusätzlich wird die kleinste und größte Defektausdehnung ( $d_{\min}$  und  $d_{\max}$ ) vermessen. Die Verhältnisse aus  $d_{\max} / d_{\text{mittel}}$  und  $d_{\min} / d_{\text{mittel}}$  geben nun an, in welchem Maße der reale Defektdurchmesser im Vergleich zum Durchmesser, der vom Defektmonitor erkannt wurde, variiert.

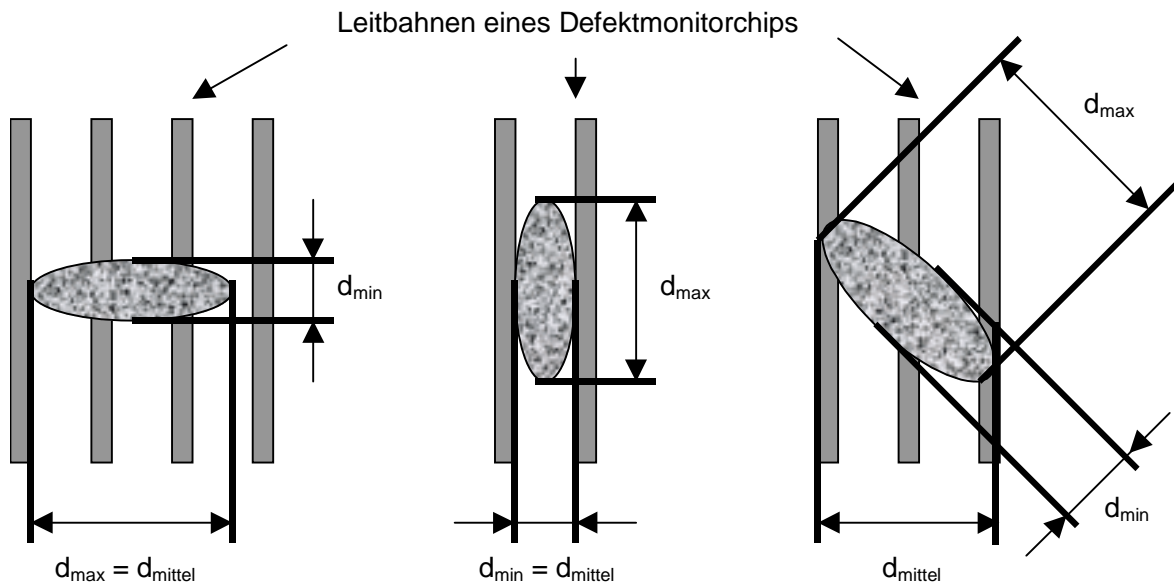


Abbildung 20: Zur Erklärung der Maße  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$  und  $d_{\text{mittel}}$  in Abhängigkeit von der Defektorientierung bzgl. der Defektmonitorleitbahnen

Bei [15] wird ein Verfahren beschrieben, wie diese Maße mit Hilfe eines vollautomatisch arbeitenden Meßplatzes bestimmt werden können. Für die vorliegende Arbeit wurden die Defektausdehnungen jedoch manuell am Mikroskop, das mit einer entsprechenden Meßeinrichtung ausgestattet war, festgestellt.

Für die weiteren Ausführungen soll ein Defekt als Ellipse modelliert werden (siehe Abbildung 20). Es läßt sich nun die Orientierung der großen Ellipsenhälfte gegen die Strukturen des Defektmonitors bestimmen. Zeichnet sich für die Gesamtheit der Defekte keine Vorzugsorientierung ab, dann registriert der Defektmonitor genauso häufig Defekte, die größer als der mittlere Defektdurchmesser sind, wie Defekte, die kleiner sind. Berechnet man die Verhältnisse  $d_{\max} / d_{\text{mittel}}$  und  $d_{\min} / d_{\text{mittel}}$  und trägt das jeweilige Ergebnis in ein Histogramm ein, dann ergibt sich zunächst eine unsymmetrische Verteilung, die sich durch das folgende Zahlenbeispiel erklären läßt:

- $d_{\max}$  sei  $5 \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{mittel}} = 1 \mu\text{m}$  und  $d_{\min} = 0.2 \mu\text{m}$
- Es ist dann  $d_{\max} / d_{\text{mittel}} = 5$  und  $d_{\min} / d_{\text{mittel}} = 0.2$ .

- Angenommen, es liegen nur die obigen Meßwerte vor, dann ergäbe sich aus dem Histogramm ein Mittelwert von  $(5 \mu\text{m} + 0.2 \mu\text{m}) / 2 = 2.6 \mu\text{m}$ . Da aber  $d_{\text{max}}$  zu  $d_{\text{mittel}}$  im selben Verhältnis steht wie  $d_{\text{min}}$  zu  $d_{\text{mittel}}$  und somit  $d_{\text{mittel}}$  durch die Messung genau richtig bestimmt worden war, hätte man hier ein Ergebnis von 1 erwarten müssen.  $d_{\text{max}}$  beeinflusst das Ergebnis also viel stärker als  $d_{\text{min}}$ .

Um das Problem der Unsymmetrie zu lösen, müssen die erwähnten Verhältnisse der jeweiligen Defektmaße entsprechend umgerechnet werden. Aus der obigen Beispielrechnung wird deshalb folgende Überlegung abgeleitet:

- Um eine symmetrische Verteilung zu erhalten, die mit der Gaußfunktion beschrieben werden kann, trägt man die Ergebnisse aus  $d_{\text{max}} / d_{\text{mittel}}$  und  $2 - (d_{\text{mittel}} / d_{\text{min}})$  in ein Histogramm ein, aus dem der Mittelwert  $\mu_d$  und die zugehörige Standardabweichung  $\sigma_d$  bestimmt wird.
- Das Zahlenbeispiel mit  $d_{\text{max}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $d_{\text{mittel}} = 1 \mu\text{m}$  und  $d_{\text{min}} = 0.2 \mu\text{m}$  ergibt jetzt  $d_{\text{max}} / d_{\text{mittel}} = 5$  und  $2 - (d_{\text{mittel}} / d_{\text{min}}) = -3$ . Damit wird  $\mu_d = (5 + -3) / 2 = 1$  und bestätigt, daß  $d_{\text{mittel}}$  genauso oft zu groß wie zu klein bestimmt wurde.

Die Größe der Standardabweichung gibt Auskunft darüber, wie stark die Defekte von der Kreisform abweichen; je größer  $\sigma_d$ , desto größer ist die Abweichung. Je näher  $\mu_d$  an 1 liegt, desto weniger haben die Defekte eine Vorzugsorientierung. So können durch die Bestätigung von zufällig verteilten Defektformen systematische Fehler der Produktionsanlagen ausgeschlossen werden.

Angenommen die Defekte seien größtenteils so orientiert, daß  $d_{\text{mittel}}$  ständig um vieles kleiner als  $d_{\text{max}}$  bestimmt wird und dafür nahe am Wert von  $d_{\text{min}}$  liegt (siehe Abbildung 20), dann wird das Verhältnis  $d_{\text{max}} / d_{\text{mittel}}$  viel größer als 1, und das Verhältnis  $2 - (d_{\text{mittel}} / d_{\text{min}})$  wird etwa 1. Trägt man diese Werte in ein Histogramm ein und stellt daraus den Mittelwert fest, so wird dieser deutlich größer als 1 sein. Die Vorzugsorientierung der Defekte ist somit rechnerisch erfaßt. Auch die Standardabweichung wird für den eben geschilderten Fall einen großen Wert liefern, weil die Werte von  $d_{\text{max}} / d_{\text{mittel}}$  und  $2 - (d_{\text{mittel}} / d_{\text{min}})$  für den überwiegenden Teil der Defekte weit auseinanderliegen.

Zusammenfassend läßt sich sagen:

1.  $\mu_d \approx 1$ : Die Defekte haben keine Vorzugsorientierung.
2.  $\mu_d < 1$ :  $d_{\text{mittel}}$  wurde überwiegend zu groß bestimmt, die Defekte sind effektiv kleiner.
3.  $\mu_d > 1$ : Die Werte für  $d_{\text{mittel}}$  waren zum größten Teil zu klein, die Defekte sind effektiv größer.
4.  $\sigma_d \approx 0$ : Die Defekte weichen kaum von der Kreisform ab.

Die Variation der detektierten Defektgröße zur tatsächlichen Ausdehnung läßt sich nun erstmals durch eine Erweiterung der Defektgrößenverteilungsfunktion  $S(d)$  berücksichtigen:

$$S_{\text{korr}}(d) = \begin{cases} \int_0^{\infty} S(x) \cdot G\left(2 - \frac{d}{x}, 2 - \mu_d, \sigma_d\right) dx & 0 \leq x < d \\ 0 & \\ \int_0^{\infty} S(x) \cdot G\left(\frac{x}{d}, 2 - \mu_d, \sigma_d\right) dx & d \leq x < \infty \end{cases} \quad (3.9)$$

$S_{\text{korr}}(d)$	<i>Defektgrößenverteilung der mittleren Defektdurchmesser unter Berücksichtigung der Defektgrößenvariation</i>
$S(x)$	<i>original festgestellte Defektgrößenverteilung ohne Defektgrößen-schwankung</i>
$G$	<i>Gaußfunktion der Form <math>y = G</math> (aktueller Wert, Mittelwert, Standardabweichung)</i>
$\mu_d$	<i>Mittelwert der Defektgrößenvariation</i>
$\sigma_d$	<i>Standardabweichung der Defektgrößenvariation</i>

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß die so veränderte Defektgrößenverteilungsfunktion vor ihrer Anwendung noch normiert werden muß, so daß gilt:



$$\int_0^{+\infty} S_{\text{korr}}(x) dx = \int_0^{+\infty} S(x) dx \quad (3.10)$$

Das folgende Diagramm zeigt für eine Defektgrößenverteilung  $S(d) \sim e^{-d/c}$  ([27], [105]) den ursprünglichen Kurvenverlauf und zum Vergleich den Kurvenverlauf, wenn er durch (3.9) und (3.10) korrigiert wird (verwendet wurden  $c = 10$ ,  $\mu_d = 1$ ,  $\sigma_d = 1$ ):

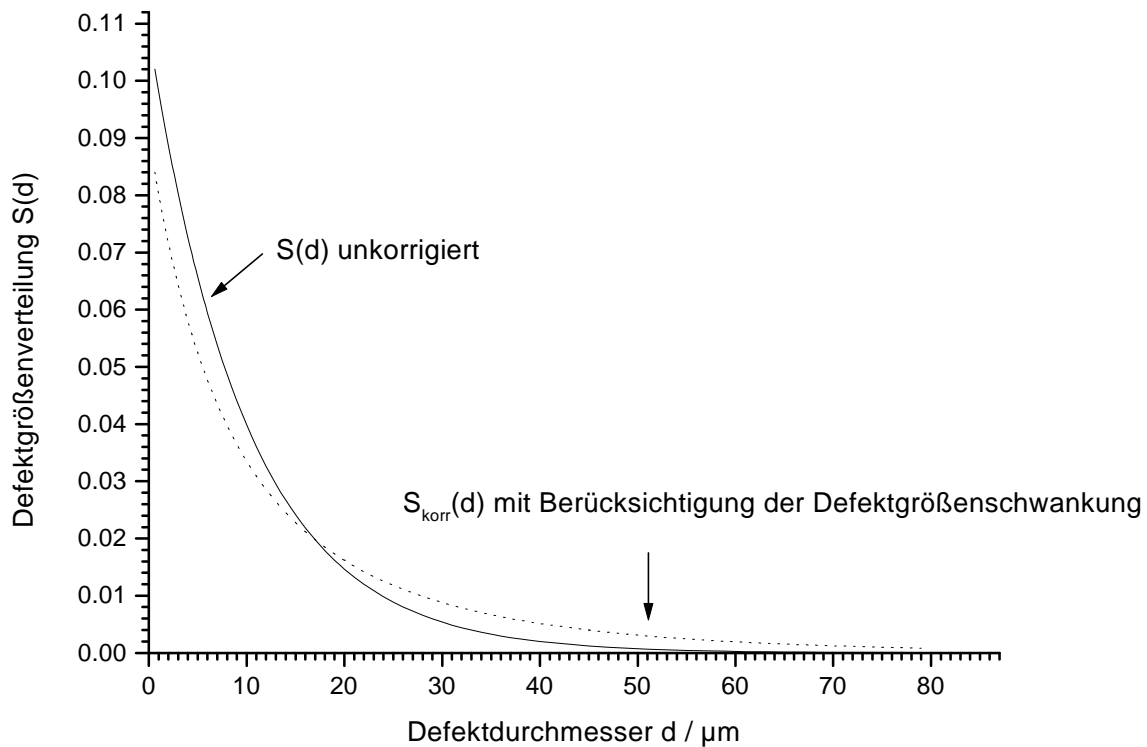


Abbildung 21: Vergleich zwischen der originalen und der angepaßten Kurve für  $S(d)$ , Erklärung im Text

$S_{\text{korr}}(d)$  fällt nicht so steil ab, wie die unkorrigierte Kurve. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß für den Wert von  $S_{\text{korr}}(d)$  durch die Multiplikation mit der Gaußfunktion nach (3.9) ein gewisser Bereich von Defekten in die Rechnung einbezogen wird. Für die Durchmesser  $d_{\text{temp}}$  dieser Defekte muß gelten:

$$\frac{d}{\mu_d - \Delta_d} \leq d_{temp} \leq (2 - \mu_d + \Delta_d) \cdot d \quad (3.11)$$

- $\Delta_d$  Entfernung der Bereichsgrenze zu  $\mu_d$ ,  
wird von  $\sigma_d$  bestimmt
- $d_{temp}$  Defektdurchmesser, der zum zulässigen  
Defektgrößenbereich gehört
- $d$  Defektdurchmesser, für den ein  
zugehöriger Größenbereich gesucht  
wird

Da die kleineren Defekte innerhalb des so begrenzten Bereiches eine größere Häufigkeit besitzen als die größeren, wird der Wert von  $S_{kor}(d)$  von den kleineren Defekten dominiert.  $S_{kor}(d)$  wird also größer sein als  $S(d)$ . Je größer  $d$  wird, desto größer wird auch der von (3.11) eingeschlossene Bereich. Damit verstärkt sich der Effekt, daß  $S_{kor}(d)$  größer als  $S(d)$  ist, immer mehr (siehe Abbildung 22) und  $S_{kor}(d)$  fällt im Vergleich zu  $S(d)$  weniger schnell ab.

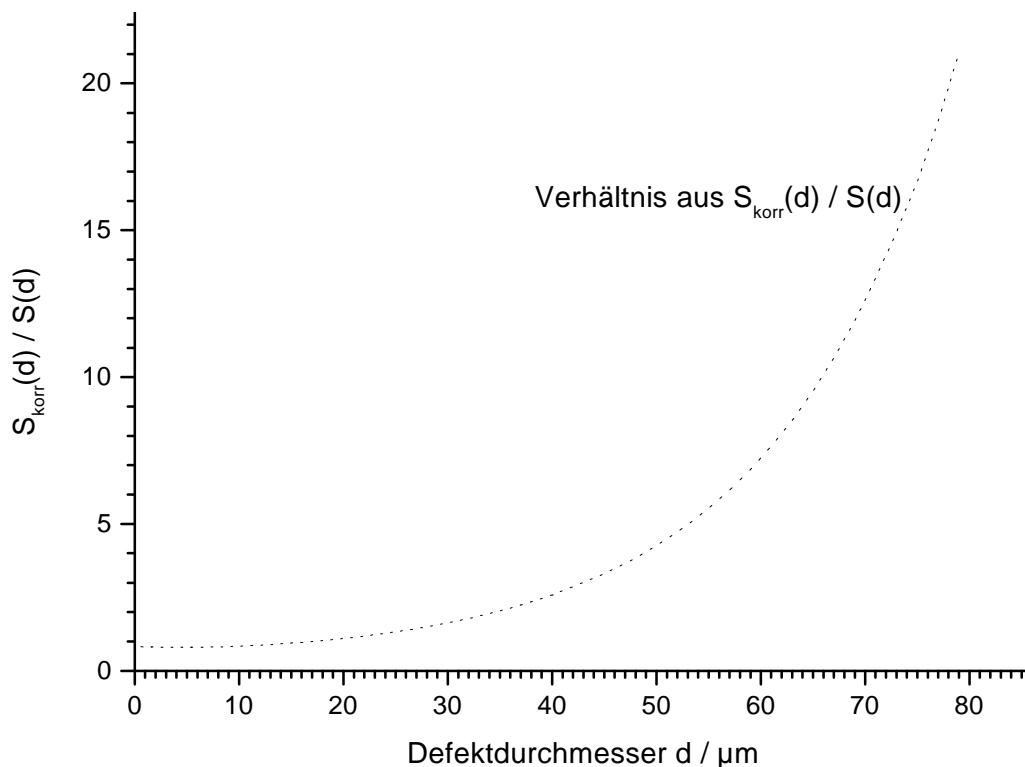


Abbildung 22: Verhältnis aus  $S_{kor}(d) / S(d)$

Wie sich die Berücksichtigung der realen Defektform auf die berechnete Ausbeute auswirkt, wird in den Abschnitten 4.1 und 7.2 demonstriert.